

GYULAI JÓZSEF

# Az emberiség útja a nanovilág felé



*Gyulai József  
fizikus,  
az MTA rendes tagja*

A nanotudományt, a nanotechnológiát a számítógépek miniaturizálásának határai indították útjára. Ám hamarosan kiderült, hogy az új utak keresésében szinte minden természettudomány összefogására szükség van – a számítástudománytól kezdve a fizikán, a kémián át az élettudományokig és a védelmi kutatásokig, azaz az egyik leginkább multidiszciplináris tudományterület jött létre. A nanotudomány a néhány atomi méretű mesterséges szerkezetek tulajdonságait és gyártási módját kutatja. Szeretné ellesni például a természettől a növények növekedésének titkát, hogy felhasználja mesterséges érzékelők, intelligens eszközök létrehozására. Ilyen eszköz lehet többek között az emberi testbe beépített intelligens orvosságadagoló. Az eredmények jelentős hatással lehetnek az emberiség energiagondjainak kezelésére is, a „fenntarthatóságra”, a reciklizáló életformára.

## Bevezetés

Meglátni a korábban nem láthatót – mindig is vágyott erre az ember. Egy harmincsepp nagyítását valószínűleg már a történelem előtti ember észlelte (1. ábra). A fénymikroszkóp felfedezése (Antonij van Leeuwenhoek)

1933-ban született. Felsőfokú tanulmányait zeneszerző szakon kezdte, majd 1955-ben a Szegedi Tudományegyetemen kapott matematika–fizika szakos tanári diplomát. 1971-től a fizikai tudomány kandidátusa, 1979-től akadémiai doktora lett. 1996-ban ő kapta meg a JATE TTK 1. sorszámu PhD diplomáját. 1990 óta az MTA levelező, 1995-től rendes tagja.

Pályáját 1955-ben középiskolai tanárként kezdte, majd az MTA egyik szegedi kutatócsoportjába került. Az 1969-ben Caltechbe (Egyesült Államok) elnyert ösztöndíj változtatta meg az életét: hazatérése után a KFKI főigazgatója meghívta egy új projekt, az Implantációs program vezetőjének; ma ugyanitt igazgató. 1989-től egyetemi tanár a Budapesti Műszaki Egyetemen, és alapító igazgatója (1993–1997) a Bay Zoltán Anyagtudományi és Technológiai Intézetnek. Életpályájának mintegy harmadát nagynevű amerikai, francia és német egyetemeken töltötte, munkatársaival együtt.

1999-től az MTA Műszaki Tudományok Osztályának elnökhelyettese. Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat volt, illetve ma tiszteletbeli elnöke, 1997–1999-között az IUPAP alelnöke.

Főbb kutatási területe: az ionimplantáció.



1. ábra. Harmatcsepp nagyítása

**Piezokerámia:**

olyan keramikus anyag, amely elektromos feszültség hatására reverzibilisen változtatja a méretét – ha kell atomi, azaz nanoméretekből.

**Pásztázó atomerő-mikroszkóp:**

az anyagok között atomi távolságon ható vonzó-, illetve taszítóerőket érzékelő eszköz.

**Pásztázó optikai mikroszkóp (near field – köztéri):**

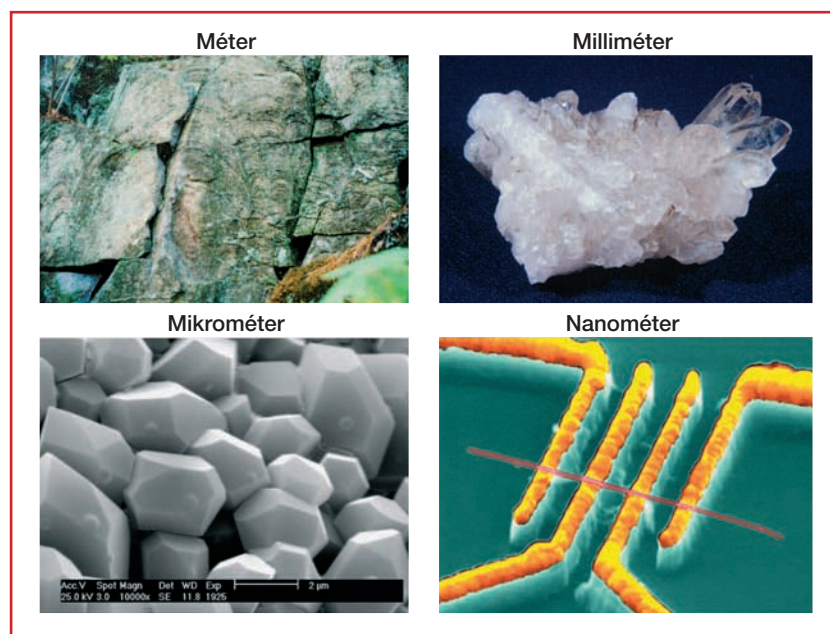
optikai szálal nanoméretűvé tett fényfóttal működő eszköz, amely az egyes pontokról kapott információt számítógépi módszerekkel alakítja képpé – emiatt nem érvényesek rá az optika korlátozó feltételei.

után a pár évtizede már atomi felbontást adó elektronmikroszkóp kifejlesztése következett. A világban élő ember horizontja fokozatosan tágult a nagyobb méretek és a kisebb méretek felé. Az elmúlt két héten – Horváth Zsolt és Patkó András előadásában – e két dimenzióknak alig elképzelhető végleteiről esett szó. A mai előadásban megmaradunk azoknál a méreteknél, amelyeket a kialakult érzékszerveink ugyan közvetlenül nem képesek érzékelni, de modern, bár költséges eszközeinkkel még „emberszerű”, antropomorf képekként, alakzatokként jeleníthetők meg. A mértékegységek „ezredelődése” négy lépésben visz le bennünket a nanovilágba (2. ábra).

Új ötlet volt a pásztázó elv felfedezése, de különösen annak általánosításai. Az elv lényege, hogy egy – lehetőleg nagyon kicsiny – ponton valamivel (fény, részecske) „megpiszkáljuk” a vizsgálandó anyagot, mire az valamivel, például elektronmisszióval válaszol. Az elektronok számát (áramot) megmérjük. Ezt követően egy szomszéd ponton végezzük el ugyanezt és így tovább. Az egyes jeleket megjelenítjük – például egy képernyőn sorba rendezve, s ezzel előáll a vizsgált anyag valamilyen tulajdonságának a „képe”. Ha emellett még meg is értjük, milyen tulajdonságot, milyen „választ” látunk, előreléptünk.

Így fejlődött ki a pásztázó elektronmikroszkóp (E. A. Ruska, Nobel-díj, 1986) és a pásztázó alagútmikroszkóp (Gerd Binnig, Heinrich Rohrer, Nobel-díj, 1986). A pásztázó alagútmikroszkóphoz évtizedek műszaki fejlesztése és egy nagy ötlet kellett: felismerni, hogy az úgynevezett **piezokerámiák** zsugorodása-tágulása a ráadott elektromos feszültség függvényében reprodukálható, és atomi méretű alakváltozást eredményez, azaz atomi méretű pásztázást tesz lehetővé. A 3. ábrán egy grafitfelület alagútmikroszkópos képe látható, ahol a hegyes tűnél fellépő nagy elektromos tér hatására „alagutaznak” át az atomok egyes elektronjai – kirajzolva a kristályos szerkezetet.

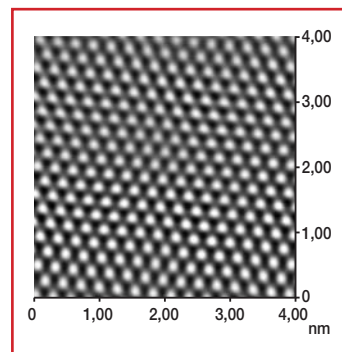
2. ábra. A méretek ezredelődése



Ezt követően azután „elszabadultak” az ötletek, és napjainkban már vásárolható **pásztázó atomerő-mikroszkóp**, **pásztázó optikai mikroszkóp** sok-sok változatban, **pásztázó mágneses mikroszkóp**, **pásztázó** (elektromos) **kapacitás-mikroszkóp**, amelyekkel vizsgálható a nanovilág.

Mindez nem teljesen idegen a mindennapi élettől sem. A korábbi lemezjátszóink „pick-up”-ja már valami ilyesmit csinált, de a számítógép rögzített mágneses adatainak kiolvasója, és különösképpen a CD-olvasók miniatűr lézere is nagyon hasonló elvet valósít meg.

Ami még izgalmasabbá tette mindezt, az az, hogy egyik-másik módszerrel akár egyes felszíni atomokat meg lehet fogni, máshová tenni, vagy éppen a kívánt helyre „odalökdölni”. A pásztázó szondás eljárások ezzel a nanotechnológia laboratóriumi méretű kísérleteinek alapeszközeivé váltak.



3. ábra. Grafitfelület alagútmikroszkópos képe

## A nanotudomány motivációja

A nanotudományt a számítástudományban bekövetkezett fejlődés hívta életre.

A számítástudomány eszközeiben döntő szerepet játszó tranzisztoroknak két típusát különböztetjük meg a bennük szerepet játszó töltéshordozók fajtája szerint: a bipoláris tranzisztorban mind az elektronok, mind a pozitív részecskéként viselkedő elektronhiány (lyuk) fontos szerephez jut, az unipolárisban lényegében csak az egyik szerepel. Az **Intel** sok magyar tudóst is tartalmazó gárdája a **Fairchild**-ből vált ki, nagy sikerrel: a technológiai higiéné elsőrendű fontosságát ők ismerték fel, és ezt kihasználva sikerült olyan tranzisztorpárokat előállítaniuk a szilíciumszeleten, amelyek számítógép-alapelemet képeznek. Az integrált áramkör Jack St. Clair Kilby (Nobel díj, 1980) első próbálkozása révén kezdett érdekessé válni.

Gordon Moore, az Intel későbbi kereskedelmi igazgatója 1965 táján üzleti terv készítése közben vette észre, hogy a gyár képes évente megduplázni az egy chipen elkészített tranzisztorok számát. Arra tette le a garast, hogy ez még pár évig lehetséges lesz. Hogy harminc évig, azt maga sem gondolta – igaz, a kettő mára 1,8-szeresre csökkent. A Moore-törvényt először az Egyesült Államok félvezetőgyárainak konzorciuma kezdte professzionálisan vizsgálni a *National Roadmap of Semiconductor Industries* [A Félvezetőipar Nemzeti Útvonala] című tanulmányban; azt akarták megtudni, mit kell tenni annak érdekében, hogy a trend folytatódjék. A nagy érdeklődés és a szakma multinacionalitása következtében – valamint amiatt, hogy a lehetőségek széles körű vizsgálata még nem veszélyezteti egyes cégek vezető pozícióját – e tanulmány egy-két évente korszerűsített tanulmánysorozattá bővült: ez az *International Technology Roadmap of Semiconductors* [A Félvezetők Nemzetközi Technológiai Útvonala].

A *Roadmap* nem sci-fi, tudós vélemények szerint reális. A 4. ábrán látható összehasonlítás azt mutatja, hogy a kétévenkénti korszerűsítés programja agresszív fejlődést jelez. A mai koncepció már a 2015-ig terjedő időszakra van szabva.

### Pásztázó mágneseserő-mikroszkóp:

a nanoméreteken fellépő mágneses tereket érzékelő pásztázó eszköz.

### Pásztázó (elektromos) kapacitás-mikroszkóp:

vezető tűszondával működő pásztázó eszköz, amely a tű és a mérendő anyag közötti rendkívül kicsiny kapacitásokat térképezi fel.

### Intel:

a világ egyik vezető félvezető-eszköz gyára.

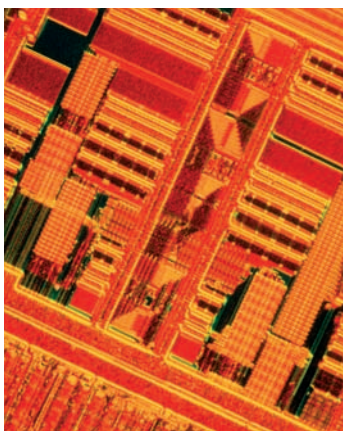
### Fairchild:

a hetvenes évekig az egyik legjelentősebb félvezetőgyár, innen vált ki az Intel alapító gárdája.





4. ábra. Gordon Moore „szabálya”  
Az International Roadmap of Semiconductor Industries 1999. és 2003. évi becslésének összehasonlítása mutatja, hogy agra szíven érvényesül a Moore-törvény, például 2001-re a 130 nanométeres tranzisztorokat tartalmazó chippek kerültek piacra. Az oxidvastagság, amelynek ellen kell állnia az eszközre adott feszültségnek, impo- náló érték, ha például a szilícium rácsállandójának 0,5 nm értékére gondolunk... A kék szín a 2002. évi korszerűsítést mutatja, a piros számokkal jelzett értékek elérése még komoly kutatást igényel



Mikrochip

Év	2001	2005	2007	2010	2016
Félmodul (nm)	150	100	80	55	-
	130	80	65	45	22
Oxidvastagság (nm)	1,6	1-1,5	1	0,8	0,5
	1,4	1,0	0,8	0,6	0,4

A miniaturizálásnak nemcsak az azonnal látható előnyei döntöek (kis méret, kis fogyasztás stb.), hanem a megbízhatóság is megnő az integrációs fokkal. Az áramkörök „öregedése” megfordíthatatlan atomi mozgásokból ered, amelyet a (helyi) melegek váltanak ki. Minél többet zsúfolunk be az áramkörbe az emberi intelligenciából, annál ritkábban kell annak tőlünk, tévedni képes emberektől bármit is kérdeznie.

Vannak véletlen események is: például ha az áramkör érzékeny részeibe radioaktív részecskék csapódnak, ezek elektronokat váltanak ki, ami a tranzisztorok áttöltődése révén – szerencsére – egyszeri tévesztéssel (single event upset) jár. (A radioaktív részecskék nem feltétlenül kozmikus vagy katonai eredetűek: az olcsó áramkörök műanyag tokjában például jelentős tóriumszennyezés szokott lenni, ami – radioaktív lévén – ugyanúgy kiválthatja a tévedést.)

Mindennek a veszélyét azonban redundáns szervezéssel, többszörözéssel nagyrészt ki lehet küszöbölni. Persze a költségek hatványozottan nőnek – példaként vessük össze egy repülőgép elektronikájának megbízhatóságát egy pár centes óra chipjével.

A mikroelektronika többszörösen is húzóerővé vált. Egyfelől a komputerrizáció, azaz az információ feldolgozása terén. Ám mindez információellátás nélkül zsákutca: kell, ahová visszacsatoljuk a feldolgozott információt. Új kihívást jelent tehát az érzékelők és beavatkozók forradalma. Az első az információ forrása, a második a szabályozás eszköze.

Az érzékelők „funkcionális anyagok”. Lehetnek egyszerűek: fizikai (mágneses, elektromos, alakmemóriával rendelkező stb.) vagy kémiai (hőre, nedvességre, savasságra, környezetszennyező anyagokra stb. változó tulajdonságú) anyagok. De lehetnek komplex technológiával kialakított eszközök (például félvezető érzékelő, lézer stb.), sőt akár biológiai rendszerek is. Ezek a funkcionális anyagok vezetnek el az érzékelők és beavatkozó elemek „forradalmához”. Ez a „forradalom” segíthet abban, hogy az emberiség teljes termelését – a termelés-fogyasztás teljes reciklizálásával együtt – kézben lehessen tartani. A nanotechnológia által kifejlesztendő elemek, eszközök jelentős elemei lesznek ennek a fejlődésnek.

A mikromechanikai megmunkálás (MEMS) a szenzorikai-beavatkozó forradalomnak kis országokban is művelhető technikája. Itt a félvezető technológia eszközeivel alakítunk ki például nyomás- és gyorsulásérzékelőket, vagy akár komplett, miniatűr kémiai, biokémiai laboratóriumokat (biochip). A mikromegmunkáló eljárások nagy előnye, hogy „öröklük” a mikroelektronika gazdaságosságát és megbízhatóságot biztosító techniká-

#### MEMS:

MicroElectroMechanical Systems: a félvezető gyártástechnológia eszközeivel mikroméreteken megmunkált, nem feltétlenül elektromos eszközök.

ját. Mint minden más terület esetében, ennek a szakmának a kifejlődéséhez is „tömegigény” szükséges, amit itt a gépkocsik légszákjának tömeges alkalmazása jelentett. A légszák vezérlőelektronikájában egy gyorsulásérzékelő chip van, amelynek nagyon pontosan kell a gyorsulást, lassulást érzékelnie (egy pontosan méretezett, finom szilíciumnyelvecskéről van szó, amelynek az elhajlását mérik). Minthogy itt szép saját eredményeink is vannak, erre és mindennek az illusztrálására később visszatérünk.

A számítógépektől az emberiség sokkal többet vár, mint például egy virtuális valóság akármilyen hű megteremtését a képernyőn. A lehetőségek kiaknázásához azonban szükséges a gépeknek adatokkal való ellátása, hogy a processzált információ segítségével azután valamilyen folyamatba be tudjunk avatkozni. Napjainkban a számítógépek teljesítményének megnövekedése szintén provokálja az érzékelők és beavatkozók „forradalmát”.

Ahogy fentebb utaltam rá, érzékelő bármilyen anyag vagy anyagokból készített komplex szerkezet lehet, amelynek a tulajdonságai valamilyen külső hatásra megváltoznak. Zrínyi Miklós professzor előadásában szerepeltek például intelligens anyagok – bár kissé különböztek azoktól, amelyekre itt gondolok. Nem elégitik ki ugyanis önmagukban, további érzékelők ráépítése nélkül azt az igényt, hogy az érzékelő végül is elektromos jelet szolgáltatson, mert a komputer csak ezt tudja kezelni. A nanotechnológia azonban kacérkodik azzal, hogy a nanorendszer a feldolgozást is önmagában, belül végezze el további molekulák segítségével – mint például egy élő sejt. Ez is „elektromosság”, legfeljebb elektronok helyett protonok közvetítik.

A miniatürizálás kérdése a Föld lakhatóságának fenntartása szempontjából is kulcskérdés: tízmilliárd ember léte csak rendkívül szervezett formában képzelhető el. Noha sokan még marginalizálják a megújuló energiaforrások szerepét, az évszázad végére jelentősnek kell lennie az atom/fúziós-energia és a megújuló energiák részesedésének.

Az egyesült államokbeli Institute of Electrical and Electronic Engineers tette közzé azt az adatot, amely szerint a megújuló energiaforrások (ez esetben a direkt napenergia hő- és elektromos termelése) csak energiasűrűség szempontjából marginálisak, összességükben nagyon is jelentősek: az Egyesült Államok területének mintegy a felén – a pazarló felhasználása mellett is – a napenergia fedezni tudná az igények hetven-nyolcvan százalékát, „amikor a legnagyobb szükség van rá”. Ha például a klímagépünk áramát helyben termeljük meg napenergiából, akkor nyugodtan járhat, nem okoz környezeti melegedést. A direkt napenergia felhasználásában az időeltolódás minimális, legfeljebb arról van szó, hogy a nappal megtermelt energiával az éjszakákat melegítjük kissé.



*Napelem. Fotovillamos cellákból felépülő energiatermelő modul*

## A nanotudomány elvei

Az anyagoknak atomi szintű láthatóvá tétele a 20. század nagy eredményei közé tartozik. Ezeknél a módszereknél az „atomi felbontás” mindig is közvetett láthatóvá tételt jelent, azaz nem magát az atomot látjuk, ha-



### Pásztázó alagútmikroszkóp (STM):

a pásztázó eszközök új fajtáit bevezető első eszköz, amely egy atomosan hegyes tű alatt, néhány atomnyi távolságban (piezokerámiával) mozgatja a vizsgálandó felületet, és az abból a tűbe átlépő úgynevezett alagútáram mérése révén képezi le a felületet.

### Oxidnövesztés:

a félvezető-technológia egyik legfontosabb eljárása, amelynek legkritikusabb feladata a tranzistorok kapuelektrodáját elszigetelni a mozgó töltéshordozóktól. A méretcsökkenéssel ennek vastagsága drámaian csökken: a mai csúcsáramköröknél mindössze néhány atomi réteg vastagságú, ennek a vastagságnak kell az üzemi feszültséget átütés nélkül kibírnia.

### Molekulasugaras epitaxia (MBE):

atomi rétegek szintjén kontrollált vékonyréteg-anyagleválasztási módszer.

### MFA:

Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézet.

nem atomok közös megnyilvánulását – mint például az atomi felbontású transzmissziós elektronmikroszkópiai képnél. Fokozatosan fedezték fel és törtek előre azok az eljárások, amelyek ugyan közvetettek, de az egy-egy atom által kibocsátott „válaszjelet” érzékelik – ilyen a már említett **pásztázó alagútmikroszkóp** és pásztázó atomerő-mikroszkóp, de ilyen a már jó fél évszázados ötlet, az úgynevezett téremissziós mikroszkóp is.

A következő lépésben az emberiség már azokat a módszereket kereste, amelyek atomi szinten kézben tartott „megmunkálást” jelentenek. Az elmúlt néhány évtizedben megjelentek olyan fizikai módszerek, amelyekkel ilyen rétegeket lehetett előállítani, ezeket azután – például a mikroelektronika rajzolatkészítő eljárásaival – a kívánt alakra lehetett „faragani”. Ilyenek a speciális **oxidnövesztések**, a **molekulasugaras epitaxia (MBE)**.

A nanotudomány eredetileg az egyedi manipulációk kifejlődésével indult. Ehhez egy szellemesen egyszerű műszaki termék létrejötte kellett, az úgynevezett piezokerámiáé. Ez a keramikai anyag, ha elektromos feszültséget adnak rá, reprodukálhatóan összehúzódik, illetve kitágul. Ez az alakváltozás olyan kicsiny, hogy az atomi méretek tartományában szabályozható. Gerd Binnig és Heinrich Rohrer Nobel-díjas ötlete volt, hogy így atomi pontossággal lehet egy tűt a vizsgálandó, illetve átalakítandó felület mentén mozgatni (pásztázó alagútmikroszkóp, STM).

Nem sokkal később meg is jelentek azok a képek, amelyek egyedi atomoknak a felületen való elrendezéséből születtek. Ezzel indult el a nanotechnológiai megmunkálások demonstrációs fázisa. Világos, hogy ilyen módon aligha lehetne „termelni”, de prototípusok elkészíthetők. Ezt kell követnie olyan eljárások kifejlesztésének, amelyek már atomok tömegeivel végzik el ugyanazt, amit az STM tűje egyetlen atommal.

A már tömeges előállításra is alkalmas jelenségek összefoglaló neve **önszerveződés**. Ez az eljárás hozza a nanotudományt a kémiával, de különösképpen a kolloidkémiával rokonságba. Egy alapvető különbséggel. Nevezetesen, a kémia korábban nem vizsgálta, hogy a kémiai reakciók hol jönnek létre, mely pontokon „támadnak”. A nanotechnológia itt ad feladatot a kémiának: a tér- és síkbeli szabályosság alapkritérium, hiszen a keletkező elemeket csak így lehet megtalálni, a számítástechnika nyelvéen: címezni.

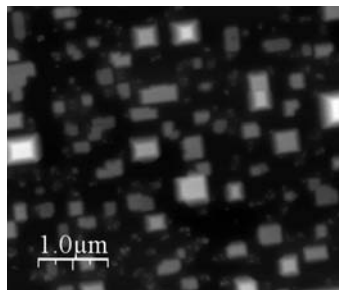
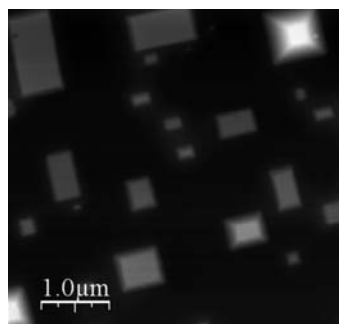
Az önszerveződés sokféle okból előállhat. A növények életéhez elengedhetetlen víz hiánya okozza, hogy a sivatagban szinte „négyzetes vetés” szerint nőnek a szegényes bokrok – a túl közel került magokból sosem lesz növény (5/a ábra). A főzőedény fenekén szabályos rendben keletkeznek a buborékok, mert „begyűjtik” a közelükben a gőzzé váláshoz elegendő energiát nyert molekulákat. Az 5/b ábrán egy vékony, egyenletes erbiumréteggel borított szilíciumfelület a hőkezelés hatására önszerveződéen átalakul – úgynevezett kvantumpöttyök keletkeznek (Pető Gábor, MFA).

Ha a rendezést szolgáló természettörvények „nyugodtan” működnek és „ellenségük” – a rend ellen ható hőmozgás – nem ront el mindent, nagyon sok rendszer „önszerveződik”.





a)



b)

## A nanotudomány területei

A nanoméretű számítógép olyan elvekre épül, amelyeknél valamilyen atomisztikus fizikai mennyiség veszi át a tranzistor kapcsolószerpét. Ilyen lehet az elektronok spinje, ugrás a szupravezető–nem-szupravezető állapot között stb.

A kvantumszámítógép megvalósítását befolyásoló legfontosabb törvény talán a Pauli-féle kizárási elv. Ez azt mondja ki, hogy egy olyan kvantummechanikai rendszerben, ahol „érzik” egymást a részecskék (fermionok), nem lehet két részecske teljesen azonos állapotban, legalábbis a spinjeiknek különbözniük kell.

Ez adta az ötletet ahhoz a géphez – a kvantum-sejtautomatához – amelynek az amerikai kifejlesztésében egy magyar tudós, Csurgay Árpád akadémikus is részt vett. Itt először egy fémponthoz álló rendszert hoznak létre egy szigetelő felületén oly módon, hogy a pontokra helyezett elektronok egymással vonzó-taszító kapcsolatban legyenek. Minden pontra két elektront helyeznek, melyek – taszítván egymást – átlósan helyezkednek el. Ha egy ponton átlökjük a rendszert, átbillen, mint egy dominósor. Ha az útvonalakat, összecsatlakozásokat különböző hosszúságúra készítjük, az ilyen sor képes algebrai feladatok (összeadás, szorzás stb.) végzésére. Persze csak nagyon-nagyon alacsony hőmérsékleten.

Az új ötletek közül egy ausztrál barátom, D. Jamieson munkáját említem, aminek az a lényege, hogy eredő spinnel nem rendelkező szilícium-izotópból ( $^{28}\text{Si}$ ) épített kristályba egy-egy kölcsönhatási távolságban lévő

5. ábra. Az önszerveződés különböző okai: a) bokrok önszerveződése a sivatagban „négyzetes vetés” szerint, b) szilíciumfelületen lévő erbiumréteg hőkezelés hatására létrejövő önszerveződése

foszforatomot implantálunk, ültetünk. Ezek spinjei képezik a kvantumkomputert. A kvantumkomputer elemeiről, a klasszikus világ és a kvantumvilág összehasonlításáról Mihály György beszélt. Jamieson ötletét, eljárását azért tartom perspektivikusnak, mert a mai **IC**-gyártás módszereit, eszközparkját alkalmazza. Egy maszkrendszer készíti, amelynek 50 nanométeres rései vannak, és ezen át implantálja – kicsiny áramokat használva – a résenként egyetlen foszforatomot, amelynek spinje lesz a Kane-féle számítógép lelke. Azaz a spinek átállításával jön létre az információ feldolgozása.

**IC:**

Integrated circuit (integrált áramkör); több (sok-sok) elemet, elsősorban tranzisztort tartalmazó áramköri chip.

**Infineon:**

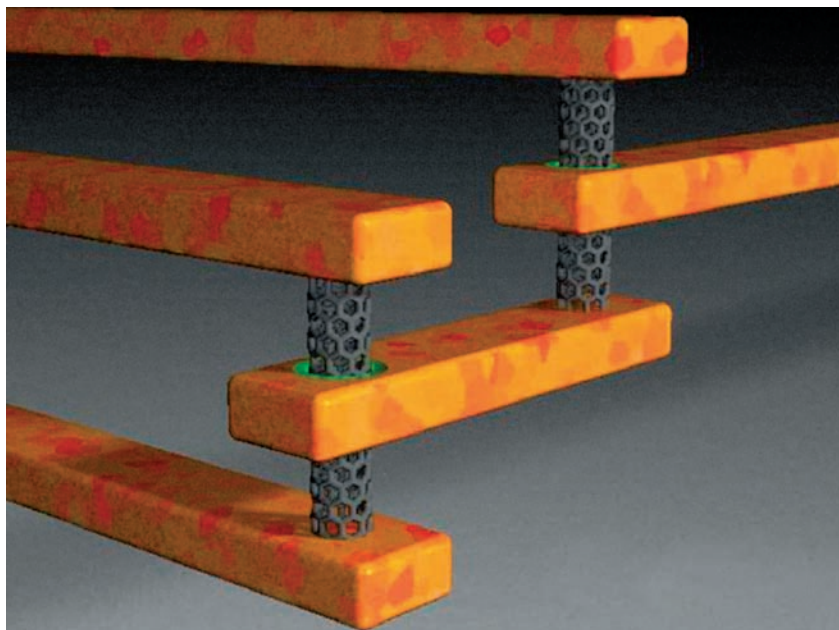
a Siemensből kivált, félvezetőtechnológiára szakosodott nagyvállalat.

Más elvű, lényegében a mai tranzisztorokhoz hasonló gépet valósít meg a szén nanocsövekre alapozott integrált áramkör – de ehhez először a nanocsövekről kell beszélnünk. A szén nanocsövet 1991-ben Sumio Iijima fedezte fel. Az úgynevezett egyfalú változatban a csövek keletkezése úgy képzelhető el, mintha grafitból egyetlen síkot lehasítanánk és csővé tekernénk. Az összetekérés módjától függ, hogy a keletkező nanocső fémes vagy félvezető tulajdonságú lesz-e.

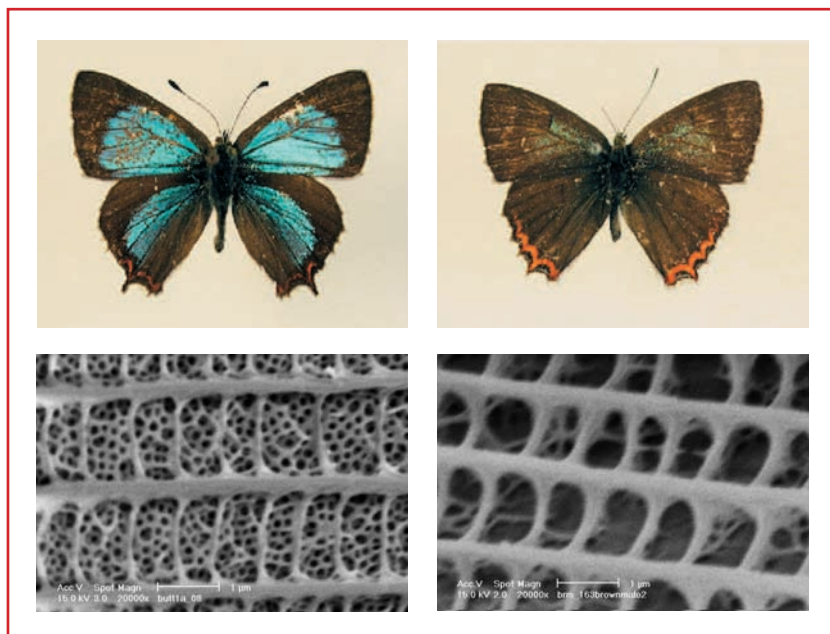
Az **Infineon** (W. Höhnlein) ezen előadásom céljaira rendelkezésünkre bocsátotta a legújabb integrált áramköri ötletét, amely a 2015 utáni idők egyik lehetséges trónkövetelőjének tűnik. Ebben a fémzés „fűrt” lyukaiba vertikálisan növesztett, félvezető nanocsövek vennék át a tranzisztorok szerepét. A sematikus ábrán a szigetelőrétegek nem látszanak, csak a sárga fémzések, amelyeket összekötnek a félvezető nanocsövek nanocső-tranzisztorpárt alkotva (6. ábra).

A fotonika, amely valahol az optika és a kvantummechanika határán fejlődő tudományág, szintén sok meglepetést tartogat az információfeldolgozás területén. Ezek közül egyet ragadok ki. A fotonikus kristályok olyan szabályos rendszerek, amelyek csak meghatározott színű (hullámhosszú) fényt engednek át, illetve vernek vissza. A természet is sok ilyen produkál: a tengeri állatok, a rovarok irizáló színét ilyen fotonkristályok okozzák. Biró

6. ábra. A szén nanocsövekből felépülő integrált áramkör ötlete. A vertikálisan megnövesztett szén nanocsövek utat kínálnak a Moore-törvény folytatódásához.  
© Infineon







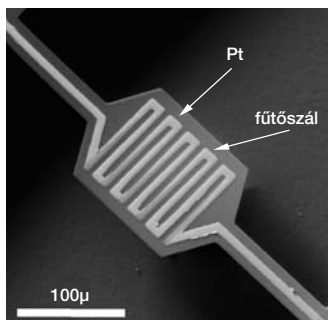
7. ábra. A lepkék férfiszépségét adó fotonikus kristályok  
© Biró, L. P et al. *Physical Review*, 2003

László Péter munkatársam és Bálint Zsolt biológus a lepkék szárnyának szerkezetét vizsgálva megállapította, hogy ugyanazon lepkefaj magas hegyen élő egyedeinek szárnyából hiányzik a fotonkristályt adó finomstruktúra, emiatt ezek egyszerű barna színűek, nélkülözik az általunk is ismert szép „férfias” színeket (7. ábra). Kiszámították viszont, hogy emiatt néhány fokkal magasabb a testhőmérsékletük, ami a magas hegységekben életmentő lehet.

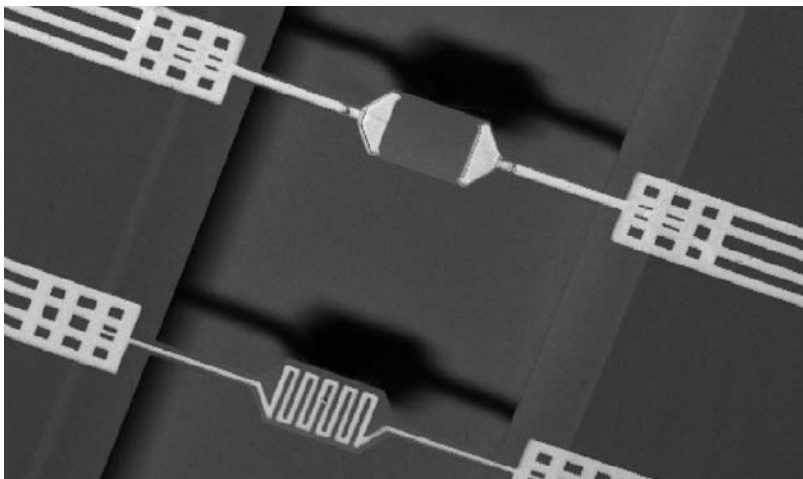
A *Magyar Tudomány* 2003. októberi száma a nanotechnológiával foglalkozó tematikus szám, amelyben a hazai kutatások egy jelentős szegmensét sikerült megjelentetni. A műszaki mikrotudománytól indulva az informatikai nanotudományon át a fizikai, optikai nanokutatásokon keresztül a kémiai nanotudományig mutatja be a magyar eredményeket. Egy átvezető cikk erejéig a biológiai nanotudomány egyik iskolájának eredményeit is ismerteti.

A kis országokban a „réskeresés” stratégiája jöhet csak számításba: meg kell keresni azokat a pontokat, ahol a saját eszközeinkkel mások által észre nem vett vagy más okból nem művelt területeken tudunk figyelemre méltót alkotni. Ilyen területnek bizonyult a lepkék szárnyán a fotonikus kristályok tulajdonságainak felfedezése, amit több külföldi napilap is közölt a tudományos oldalain.

A mikromegmunkálás, az MEMS terén elért saját eredményeinkről is szeretnék szólni. A mikromegmunkálás témáját is olyannak tartottuk, ahol a hazai eszközök, lehetőségek elegendőek ahhoz, hogy figyelmet kelthető eredményekre jussunk. Már korábban is dolgoztunk a hazai iparnak nyomásadó chipek fejlesztésével, kis sorozatú előállításával. Ezen az alapon jöttek létre azok a konzorciumok, amelyek az Európai Unió „Mesterséges szaglás” néven futó prioritásához vezettek. E program végcélja a kábítószer-, a robbanószer-, a környezetkárosító gázmolekulák mérése, azonosítása. Az egyik elv egy szabályozható mikrofűtőtestre alapozódik,



8. ábra. A szabályozható mikro-fűtőtest



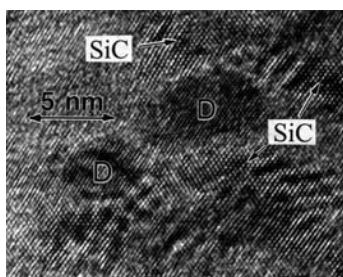
amelyre katalitikus anyagok vihetők fel, és az égéshő mérésével lehet az anyagokat mérni, a katalizátorral azonosítani (8. ábra, Bársony István, Dücső Csaba és mások).

A témában jelenleg egy hatelemű chip kifejlesztése folyik környezetvédelmi célokra (szeméttelpek kigőzölgése). A chipen egy új rendszerű, mikroméretű gázáramlásmérő is van, amely úgy méri az átszivattyúzott gáz mennyiségét, hogy egy mikrofűtőtest hőimpulzussal kissé felmelegíti az alatta áramló gázt és egy – meghatározott távolságban létrehozott – hőmérőnek kialakított érzékelővel mérjük, hogy mennyi idő múlva ér oda a melegített gáz.

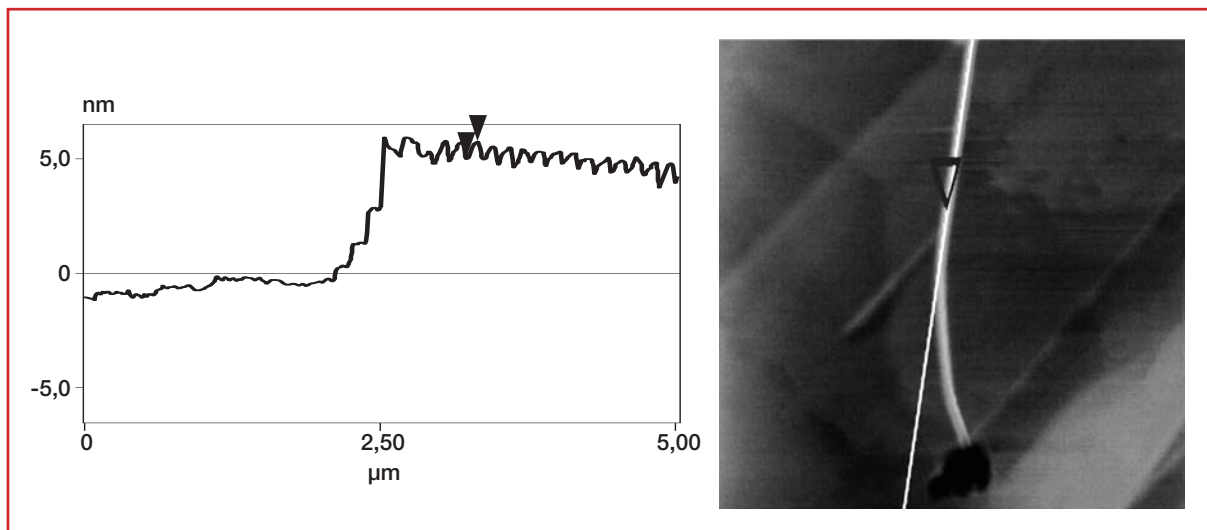
A mikrotechnika lehetővé teszi, hogy tapintásérzékelőt fejlesszünk hasonló elven. Ennél a lebegő lemez elbillenését mérjük elektromos úton.

A nanotudomány területei közé tartoznak a nanoátalakítások is.

A nanokristályok – akár zárványként – nagyon sok izgalmas feladatra alkalmasak. Sok olyan tulajdonságuk van, amely a nagyobb méreteknél ismeretlen. Többféle módszerrel lehet ilyeneket előállítani. Az MFA a különféle vékonyréteg-leválasztásokban és az ionimplantációban jártas. Egy ilyen különlegesség látható a 9. ábrán, ahol szénionokkal implantáltuk (bombáztuk) a 800 °C-ra hevített szilíciumkarbid-kristályt, és ekkor a belőtt szénatomok összekapcsolódtak gyémánt nanokristály-szemcsékké (Pécz Béla, valamint a rossendorfi FZR kutatói – a kép egy új, pályázati úton beszerzett, nagy felbontású elektronmikroszkópunkkal készült). Izgalmas téma az olyan szilícium-oxidba ágyazott szilícium nanokristályok előállítása, amelyektől remélhető, hogy úgynevezett stimulált emisszióra képesek, azaz végre lézertényt lehetne a szilíciumból is „kicsiholni”. Ennek a távlatai szinte beláthatatlanok – hiszen a szilícium „istenáldotta” anyag, de átok ül rajta: hagyományosan nem lehet lézert csinálni belőle. Emiatt azután nem volt igazán sikeres az integrált áramkörti technikának és az optikai adatfeldolgozásnak a kombinálása – egyetlen chipen! Az egyik elismerten sikeres kutatásunk a szén nanocsövek (carbon nanotubes, CNT) előállítása és átalakítása. Az első CNT-t – mondhatni – véletlenül készítettük: 1992-ben Dubnában nagyon nagy energiájú ionokkal



9. ábra. Gyémánt nanokristály-szemcsék szilíciumkarbidban  
© Pécz, B. et al. *Applied Physical Letter*, 2003



10. ábra. Az első, véletlen szerencsével előállított nanocsővünk

bombáztunk grafitot, és az alagútmikroszkóp szálakat jelzett a becsapódási kráterekből kiindulva (10. ábra, Biró László Péter, Havancsák Károly, Gyulai József).

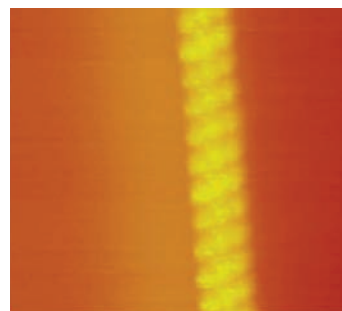
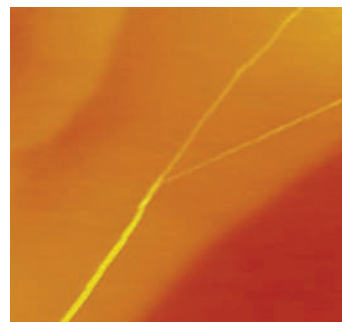
Mivel a nanocsöveket alig korábban, 1991-ben fedezte fel Iijima, egy ideig eltartott, míg ellenőriztük, hogy valóban CNT-t állítottunk-e elő – egy új módszerrel. Sikertült az ionos bombázást alkalmazó, úgynevezett FIB (focused ion beam – fókuszált ionsugár) berendezéssel elvágnunk a csövet, és a mikroszkópban a lyukat észlelni.

A CNT különleges anyag: tulajdonságai a gyémántéval vetekszenek. Említetük, hogy lehet fémes vagy félvezető tulajdonságú. A mechanikai tulajdonságai még érdekesebbek: olyan szilárd, hogy a saját súlyát a Földön kb. 500–600 km hosszban elbírná! (Összehasonlításul: az acélra ez az érték 25–30 km.) Érthető tehát a világszerte megnyilvánuló érdeklődés például a kompozitanyag „töltelékeként” való felhasználása iránt.

A jelenlegi munkáink – melyek Biró László Péter irányításával zajlanak, és sok fiatal is részt vesz bennük – a nanocsövek átalakításával kapcsolatosak. A CNT hatszöges elemekből áll, van egy- és többfalú változata. Sikertült a csoportnak olyan eljárást kidolgoznia, amellyel a hatos gyűrűk közé egyes helyekre ötös vagy hebes gyűrűket építünk. Ennek eredménye mechanikai feszültségek beépítése, ami például elágazásokat hoz létre vagy hengerspirál kialakulását eredményezi (11. ábra).

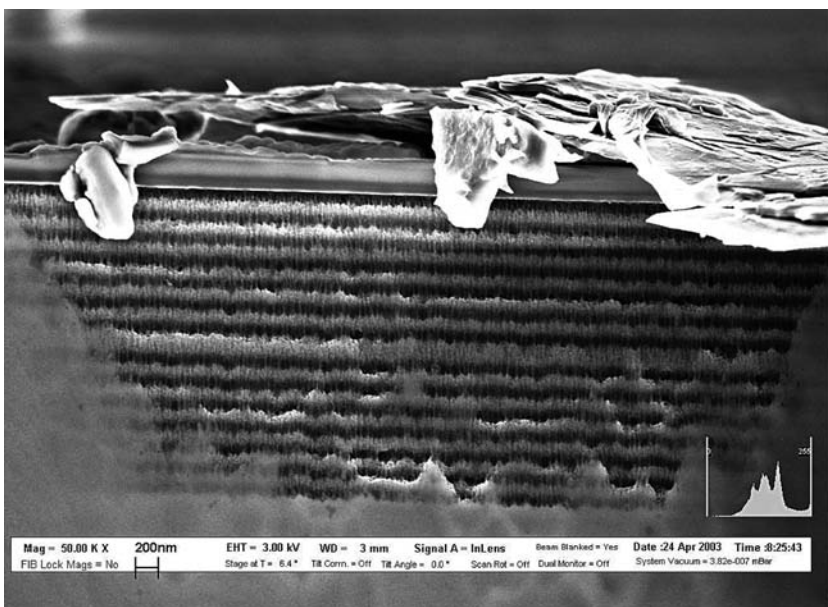
## Nanomegmunkálások

Intézetünk nemrégén pályázati úton hozzájutott egy különleges eszközhöz, egy úgynevezett nanomegmunkáló állomáshoz. Ez alapjaiban egy LEO gyártmányú, különlegesen nagy érzékenységű (1–2 nm!) pásztázó elektronmikroszkóp, amelybe két kiegészítő eszközt építettek be. Egy úgynevezett fókuszált ionnyalábban működő ionmarót (FIB), amellyel szubmikronos léptékben lehet az anyagot eltávolítani, „faragni”, és egy olyan leválasztó („rajzoló”) rendszert, amely ötféle gázt tud a megmunkálandó anyagra ráfújni, amelyek azután az érkező elektronok vagy ionok hatására



11. ábra. Szén nanocső Y-elágazással, illetve spirálisan feltekerve  
© Biró, L. P. et al. *Mathematical Science and Engineering*, 2002





12. ábra. Optoelektronikai elem keresztmetszete

vegyülve lecsapódnak a felületre. Mindezen folyamatokat a pásztázó mikroszkópban menet közben látjuk, vezérelhetjük.

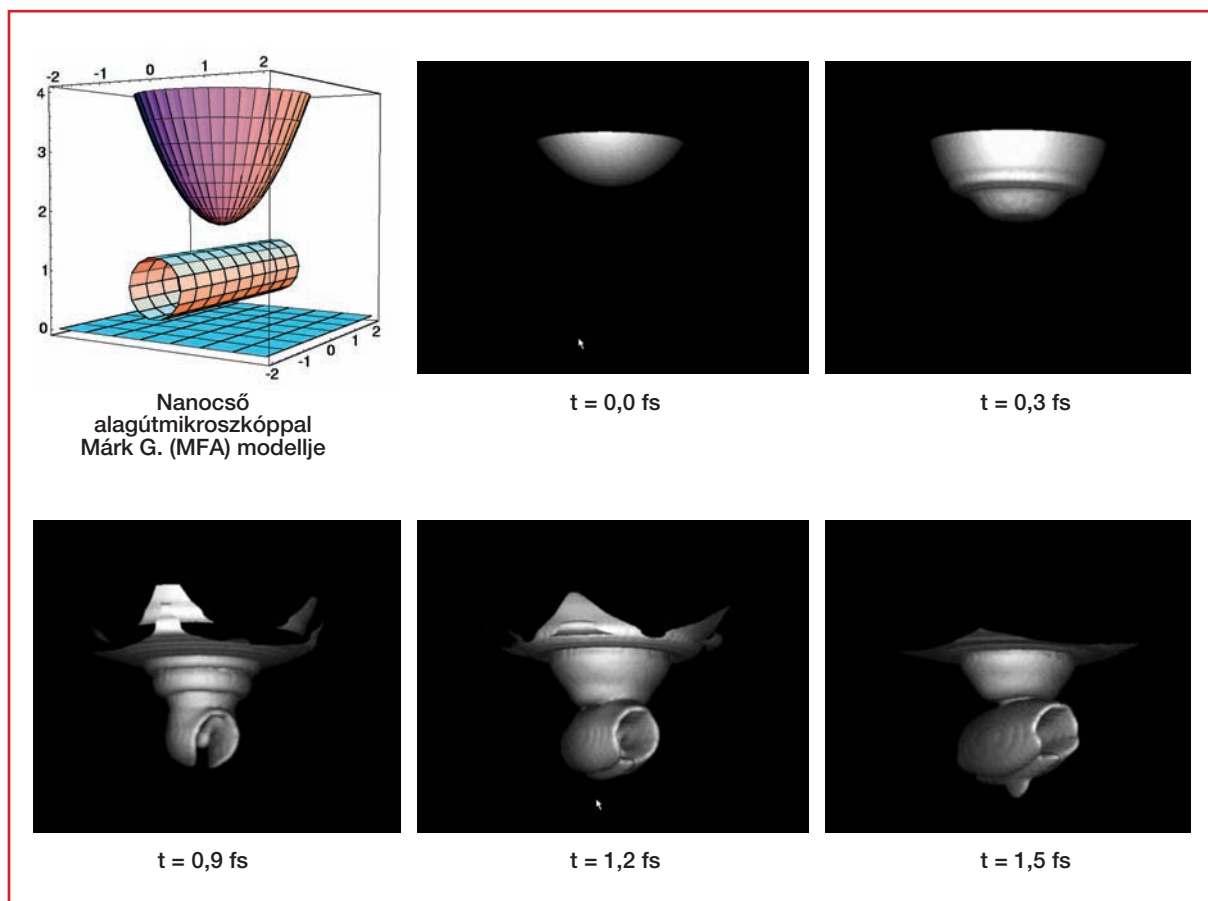
Saját eredményként egy felboncolt optikai elemen, az úgynevezett Bragg-reflektoron mutatjuk be a vágás műveletét (Tóth Attila, Volk János). A 12. ábra réteges szerkezete a szilícium egy különleges, úgynevezett pórusos változatától ered, ahol – az optikai állandók változtatása érdekében – a pórusosságot változtattuk, hogy negyed- és egy félhullámhossz vastagságú rétegek jöjjenek létre, amelyek a fényt egy szűk hullámhossz-ablakon engedik át. Ezen az ábrán a végső „polírozást” nem a LEO gépben, hanem olyan ionmaróval készítettük, amelynek a különböző generációi évtizede a világ előtt jártak egy lépéssel. Barna Árpád konstruktóri tudását dicséri ez a gépcsalád.

## Szimulációk

A szimuláció a modellalkotásnak az a mai fajtája, amely egy jelenséget – többé-kevésbé a maga komplexitásában – számítógépes módszerekkel leír, láthatóvá, megtapasztalhatóvá tesz. Azaz a modellalkotás egy program-csomagként realizálódik. Ez többféle elv alapján lehetséges. Számomra, aki az alap kutatásból indultam el, azok a szimulációk a legkedvesebbek, amelyek az úgynevezett első elvekből kiindulva jutnak el a valóságot jól közelítő eredményhez.

A mikroelektronika fejlődése csodálatos bizonyítéka a szimulációs eljárások – például a technológiaszimuláció – sikerének. Sokat lehetett hallani róla, hogy több méretgeneráció-váltásnál számítógépen dolgozták ki az új technológiát, és már az első napi termék eladható volt (a Nippon Electric Company esetében a 64 MB-ról a 128 MB-ra való átállásnál hallottam ezt először dicsérőleg emlegetni).

A mérési eljárások szimulációja is rendkívül fontos, mert segítségükkel a mérés kiértékelés jutott új korszakba.



A nanotechnológiában Márk Géza kollégám tudása révén elsőként sikerült az alagút-mikroszkópiára első elvekből – ez esetben a Schrödinger-egyenletet megoldva egy alaplemezen lévő egyfalú szén nanocsőre – az elektronfelhő mozgását láthatóvá tenni. A 13. ábra mutatja az elektronfelhő alakját egy-egy időpontban. Egy magyar kutató (Vonderviszt Ferenc, Veszprémi Egyetem) japán útján részt vett az *E. coli* baktérium flagellumának modellezésében.

13. ábra. Az elektronfelhő alakjának változása

© Mark, G. I. et al. *Physical Review*, 2000

## A nanotechnológia finanszírozottsága

A téma felfuttatására először Clinton elnök hirdetett meg speciális kereteket az Egyesült Államokban. Ezt követte Japán, majd az Európai Unió, illetve a nagyobb európai országok nemzeti projektjei (például Németország). A téma reális, de a fantasztikum határait súrolják a kidolgozandó ötletek. Hazánkban is több sikeres pályázat volt, több OTKA-pályázat mellett két nanotechnológiai NKFP pályázat is. Legújabbán a Miniszterelnöki Hivatal támogatásával indult kutatás az MFA koordinálásával *Nanogas* címen a környezetmonitorozás új, nanotechnológiára alapozott eszközének kifejlesztésére.

Az Európai Unió 6. Keretprogramjába kiemelt prioritásként épült be. Az informatikai, egészségügyi és környezetmegóvási célú tematikák kutatását több „prioritás” közös felhívásai segítik. A 7. Keretprogram tovább erősíti Európa versenyképességét.

# Hová tartunk? Vízió és valóság

A világ nagyon sok lehetséges és fantasztikus álmot álmodott meg a nanotechnológia terén. Itt csak röviden megemlítiük, mit szeretne a nanotechnológia tudósgárdája a természettől ellesni.

## Bio-nanomotorok

A biológiában a forgómozgás csak néhány célra állta ki az evolúció próbáját. Ahol azonban ez – kizárólag nanoméreteken – bekövetkezett, az igen általános, és az élet fontos elemeként tartjuk számon. Az úgynevezett adenozin-trifoszfát (ATPase) a sejtek energiaellátásának kulcsa. Ez a molekula kémiai energiát alakít forgómozgássá. Így válik a molekuláris motorok tanulmányozásában alapvetővé az ATPase-molekula vizsgálata.



*E. coli* baktérium

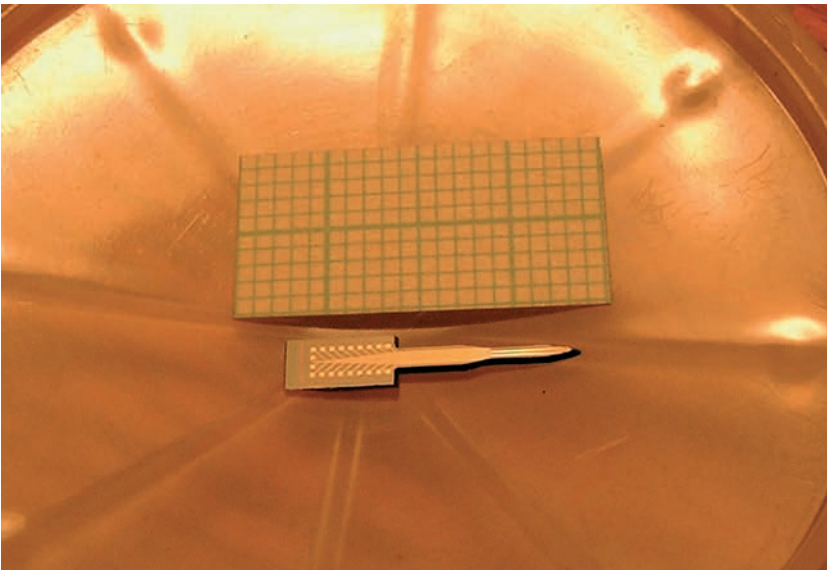
Egy másik ilyen „bevált” forgás az *E. coli* baktérium csillója (flagellum), a baktérium helyváltoztatásának eszköze. Ez a csóvává tekeredő fonalrendszer két irányban is képes forogni, és elviszi a baktériumot onnan, ahol „rosszul érzi magát”. Mint említettük, Vonderviszt Ferenc személyében magyar kutató is részt vett abban a munkában, amely a csilló növekedését, működését vizsgálta Japánban. Az ő kapcsolatainak köszönhetően Keiichi Namba, a Protonic NanoMachine Project, Erato (JST Project) igazgatója is rendelkezésünkre bocsátotta azt a filmanyagot, amelyet az elektronmikroszkópos *in vitro* vizsgálatok képi eredményeiből szintetizáltak mozgóképpé. Egy ilyen csilló úgy néz ki, mint az emberi villanymotor, csak protonok „hajtják”.

Modellkísérletek folynak a molekulának mesterséges nanomotorként való felhasználására. E terület egyik legjelentősebb kutatója, Carlo Montemagno (UCLA, Egyesült Államok) egyik modelljében a molekula forgó rúdjaára ültetnek egy pálca alakú molekulát, amely együtt forog az ATPase-zal, a másikonál maga az ATPase-t dobja fel a felszabaduló energia.

A kémiával való rokonság azért nem egészen azt jelenti, hogy a kémia – főleg a kolloidkémia – mindig is nanotechnológiát csinált. A kémia korábbi feladatainál ugyanis a reakciók támadási pontjai véletlenszerű helyeken lehettek. Az volt a lényeg, hogy teljes terjedelmében előálljon a reaktorban a kívánt vegyület. A nanotechnológia, amely valahol az informatikai alkalmazások húzóerejét használja, akkor tud egy szerkezetet működtetni, ha azon a funkcionális elemek rendezetten helyezkednek el. Ez kell ahhoz, hogy „címzetten” tudjuk őket befolyásolni, kiolvasni. Az önszerveződést megvalósítani – ez a nagy feladat. Az önszerveződés ellen dolgoznak tudniillik a statisztikai, a hőrengéses stb. események. Ezek tehát nagy ellenségei a nanotechnológiának – ha nem alacsony hőmérsékleten akarjuk művelni.

Annak ellenére, hogy az informatikai alkalmazások húzzák az ipart, könnyen lehet, hogy a nanotechnológia igazi területévé az élettudománybeli alkalmazások válnak. Talán nem önmagukban, hanem interdiszciplinárává összekapcsolódva.

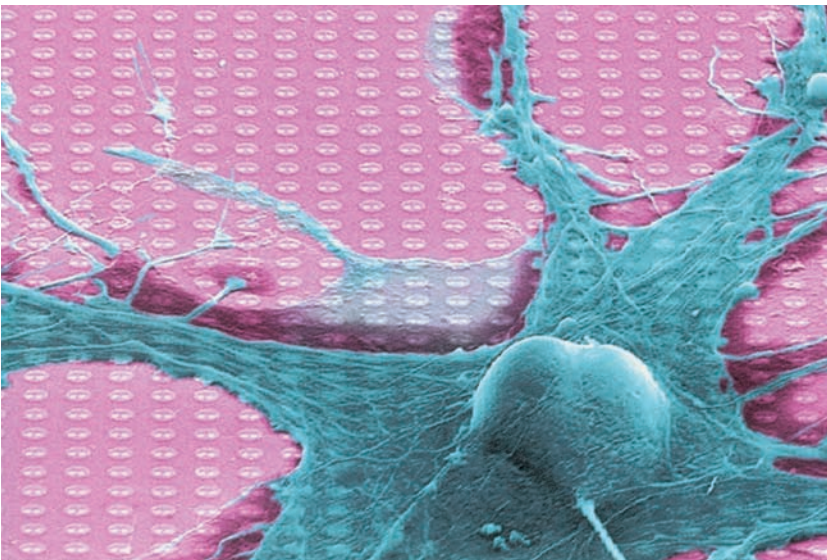




14. ábra. Az első agyszondánk

Ezen a területen sok minden történt is már. A mi intézetünk (Bodócs László) már a nyolcvanas évek végén kooperált a KFKI RMKI kutatóival (Jánossy Vera) az agy elektromos jeleinek regisztrálására. Készült is az akkori technológiai szintünknek megfelelő, 16-kontaktusos elektródarendszer, amely a macskák agyába ültetve hetekig alkalmas volt az idegi működés tanulmányozására. Más biokompatibilis chipeket is készítettünk, például olyanokat, amelyek elektródáival csiga-neuronokat tudtunk stimulálni hosszú időn át, azaz a neuron kellemesen érezte magát a tápoldatba merített chipen (14. ábra). Ez a kísérlet jutott eszembe, amikor nemrég megkaptam ehhez az előadáshoz az Infineon drezdai gyárában mai csúcstechnológiával készült biochipről készült anyagot, amellyel szintén neuronokat vizsgáltak (15. ábra).

A biochipekről beszélve idekíváncozik egy aktualitás: nemrég járt hazánkban – az EU Fiatal Kutatók Versenyén – Ivar Giaever Nobel-díjas professzor, aki már a díj előtt a biofizikával kezdett foglalkozni, és olyan



15. ábra. Az Infineon nanoméretű biochipje

**Genomics:**

az élőlények génszerkezetét tanulmányozó tudomány.

eszközöket fejlesztett és gyárt, amelyekkel annyira gyenge jelekkel gerjeszthetők a sejtek, hogy „észre sem veszik”, hogy vizsgálják őket. Ez is biochippel működik.

A **Genomics** biochipjének előállításához is a félvezetők eszköztára kell, de a rögzített és aktivált fehérjék jelenek detektálása fluoreszcenciával, optikai képfeldolgozással történik.

## A nanotudomány gondjai

Most néhány gondot – sokszor személyes véleményt – szeretnék az olvasóval megosztani. A nanotechnológia ambíciója, hogy ellessze az élővilág „trükkjeit”, például a növényi élet direkt napenergiára alapozott működését („Nap-élet”), és ezzel új szerkezeteket állítson elő; ez izgalmas és mindenképpen kutatásra érdemes kérdés. Hogy a DNS képes nemcsak fehérjéket rendezni, hanem például fématomokat is befoglalni a spiráljába, azt mára öt rézatomra bebizonyították. Az Argonne National Laboratories közölte, hogy funkcionális fehérjék aranyatomokat képesek szabályosan elrendezni.

A gondokat másutt látom. Az emberiséget a fosszilis anyagok okozta energiabőség elkényeztette egy sok nagyságrenddel nagyobb termelékenységgel, mint amit a Nap-élet tenne lehetővé. Tehát a civilizáció eszközeit nem „növesztjük”, hanem „termeljük”. A termelés lényege, hogy – a minőségi követelmények határain belül – azonos („klónszerű”) termékeket állítunk elő, nagy tömegben, gyárakban.

Az élővilág fejlődése ezzel szemben néhány sarkalatosan más ponton nyugszik. Az evolúciós fejlődés lényege az önreprodukció, és ha egy-egy kis hiba (mutáció) csúszik be, az új minőséget annak tartós, örökített fennmaradása teszteli. Ha a mai ipar minőség-ellenőrzésének, a Total Quality Managementnek a követelményeivel akarom ezt összevetni, nagy gondokat érzékelek. A mai ipar megbízhatósági követelményei óriásiak, az élővilág sokkal több hibával fejlődik. Gondoljunk például egy repülőgép elektronikájára – úgy, hogy éppen benne ülünk. A kiemelkedő minőségű (például katonai) áramköröknél legfeljebb minden  $10^{10}$  elvégzett művelet esetén lehet egyetlen tévesztést tudomásul venni, de még ez sem jelent katasztrófát: a mai gyors számítógépek – a kormány tényleges elfordítására kiadandó parancsot megelőzően – akár sok százszor újra ellenőrizhetik a gyanús eredményt. Ezt a megbízhatóságot az élővilág aligha tudja produkálni.

Egy nanotechnológiai „termék” tesztje a természetes kiválogatódás gyorsított változatát igényelné. Azaz nem fogadható el, hogy arról a generációk sora („vevői elégedettség?”) döntsön. Erre vonatkozó megoldásról nincs tudomásom.

Fontos az is – mint minden nagy eredménynél –, hogy az alkalmazást megelőzze a gondos hatásvizsgálat – már amikor erről szó lehet. De látjuk, hogy az emberiség ezt sosem tette meg. Így folyamatában kell a hatásokról meggyőződni.

Vajon időben vagyunk-e a mikroelektronika utáni felkészülésre? Erre egy példa: jelen lehettem a Cornell Egyetem Submicron Facility laboratóriumán egy szakmai diszkusszión, amely az akkor elkészült első 100 nanométeres tranzisztorok „kihozatalának” feljavítását célozta. Figyeljünk a dátumra: 1986 nyara. A 100 nanométeres tranzisztor tömegtermékként csak 2001-ben jelent meg – akkor is csak az élvonalbeli gyárakból. Azaz tizenöt év kellett hozzá. Nos, a 2018 utáni „valaminek” tehát már itt kellene lennie, legalábbis laborszinten. Nagy optimizmus kell ahhoz, hogy azt gondoljuk, az itt elmondott sci-fik bármelyike olyan állapotban van, mint a 100 nanométeres tranzisztor volt 1986-ban.

Mire ez az előadás megjelenik, további érdekességek, eredmények születnek – és talán jobban kézben is tudjuk tartani a feltáruló világot, nehogy Goethe Zaubrerlingjének (bűvészinásának) seprűjeként kikerüljön az ész kontrollja alól.

## A 21. századi emberiség missziója

Az emberiség fő problémája a 21. században az energiagazdálkodás és a környezet fenntartása. Ennek megfelelően a fejlett emberiségnek az a missziója, hogy kidolgozza azt a módozatot, amely szerint tízmilliárd ember tartósan élhet, azaz a zárt ciklusú termelés-fogyasztás megteremtése minimális anyag- és energiaráfordítással. Amit lehet, a megújuló energiafajtákra kell terelni. A többi atomerőművekben, illetve majd fúziós úton kell előállítani. De a Föld felmelegedését nemcsak az üvegházhatás váltja ki, hanem az is, ha az érkező napenergia tízezredénél többet szabadít fel többletként az emberiség.

Mit tehet a nanotudomány ebben a misszióban? Sokat. Eleve anyagtakarékos, de hogy energiatakarékos lesz-e a jövőben is, az majd ki fog derülni.

Köszönetnyilvánítás: Nagyon hálás vagyok a munkatársaimnak, nem csak az itt névvel szereplőknek, hiszen egy intézet kollektívájának évtizedes munkássága juttatott minket ide és engem reflektorfénybe – ahol a megérdemelnél biztosan több dicsőségben van részem. Nagyon köszönöm azoknak a barátaimnak a világ minden részén és azoknak a cégeknek, akik és amelyek önzetlenül lehetővé tették csodálatos anyagaik felhasználását.





## Ajánlott irodalom

- Barna Árpád – Menyhárd Miklós: Ionbombázás és nanotechnológia. In: *Nanotechnológia – az átalakulások tudománya. Magyar Tudomány*, 48. (2003) 9. sz.
- Bársony István: Mikroгépészeti eljárásokkal a nanotechnológia felé. In: *Nanotechnológia – az átalakulások tudománya. Magyar Tudomány*, 48. (2003) 9. sz.
- Beke Dezső – Erdélyi Zoltán – Szabó István – Cserhádi Csaba – Langer Gábor – Daróczi Lajos: Diffúzió nanoskálán. In: *Nanotechnológia – az átalakulások tudománya. Magyar Tudomány*, 48. (2003) 9. sz.
- Biró László Péter: Újszerű szén nanocső architektúrák. In: *Nanotechnológia – az átalakulások tudománya. Magyar Tudomány*, 48. (2003) 9. sz.
- Biró, L. P. – Bálint, Zs. – Kertész, K. – Vértessy, Z. – Márk, G. I. – Horváth, Z. E. – Balázs, J. – Méhn, D. – Kiricsi, I. – Lousse, V. – Vigneron, J.-P.: Role Of Photonic-Crystal-Type Structures In The Thermal Regulation Of A Lycaenid Butterfly Sister Species Pair. *Physical Review*, E 67, 021907–1 (2003).
- Biró, L. P. – Ehlich, R. – Osváth, Z. – Koós, A. – Horváth, Z. E. – Gyulai, J. – Nagy, J. B.: Room Temperature Growth Of Single Wall Coiled Carbon Nanotubes And Y-Branched, *Mathematical Science and Engineering*, C 19 (2002) 3–7.
- Czitrovsky Aladár – Hámosi András – Kiss Árpád – Pogány Lajos: Nagyfelbontású lézer-interferometrikus felületvizsgáló berendezés a nanotechnológia szolgálatában. In: *Nanotechnológia – az átalakulások tudománya. Magyar Tudomány*, 48. (2003) 9. sz.
- Csurgay Árpád: Áramkörelmélet a nanotechnológiában. In: *Nanotechnológia – az átalakulások tudománya. Magyar Tudomány*, 48. (2003) 9. sz.
- Dékány Imre: Nanoszerkezetű anyagok és a kolloid állapot. In: *Nanotechnológia – az átalakulások tudománya. Magyar Tudomány*, 48. (2003) 9. sz.
- Guczi László: Fém nanorészecskék katalitikus tulajdonságai. In: *Nanotechnológia – az átalakulások tudománya. Magyar Tudomány*, 48. (2003) 9. sz.
- Gyulai József: Bevezető gondolatok. In: *Nanotechnológia – az átalakulások tudománya. Magyar Tudomány*, 48. (2003) 9. sz.
- Kálmán Erika – Csanády Andrásné Bodoki Ágnes: Nanoszerkezetű bevonatok. In: *Nanotechnológia – az átalakulások tudománya. Magyar Tudomány*, 48. (2003) 9. sz.
- Kónya Zoltán – B. Nagy János – Kiricsi Imre: Szén nanocsövek előállítása és alkalmazásai. In: *Nanotechnológia – az átalakulások tudománya. Magyar Tudomány*, 48. (2003) 9. sz.
- Króó Norbert: Felületi plazmonok és közeli térmikroszkópia. In: *Nanotechnológia – az átalakulások tudománya. Magyar Tudomány*, 48. (2003) 9. sz.
- Mark, G. I. – Biro, L. P. – Gyulai, J. – Thiry, P. A. – Lucas, A. A. and Lambin, P.: Simulation Of Scanning Tunneling Spectroscopy Of Supported Carbon Nanotubes. *Physical Review*, B 62, 2797–2805 (2000).
- Nanotechnológia – az átalakulások tudománya. Magyar Tudomány*, 48. (2003) 9. sz.
- Pécz, B. – Weishart, H. – Heera V. and Tóth, L.: Diamond formation in cubic silicon carbide. *Applied Physical Letter*, 82. (2003) 46–48.
- Vámosi György – Bodnár Andrea – Györffy Miklós – Bene László – Damjanovich Sándor: Nanotechnológia a biológiában. In: *Nanotechnológia – az átalakulások tudománya. Magyar Tudomány*, 48. (2003) 9. sz.